

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621. 891

САМОАДАПТАЦИЯ ТРИБОУЗЛОВ К УСЛОВИЯМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Е.С. Венцель, проф., д.т.н., Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. На общеизвестных примерах показано, что какие бы процессы не протекали в трибоузлах, в последних в процессе эксплуатации самостоятельно (без вмешательства извне) происходят явления, способствующие снижению трения и скорости изнашивания. Это свидетельствует о структурной самоадаптации трибоузлов, которые в полной мере можно отнести к термодинамическим системам.

Ключевые слова: узел трения, износ, масло, сила трения, интенсивность изнашивания.

САМОАДАПТАЦІЯ ТРИБОВУЗЛІВ ДО УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Є.С. Венцель, проф., д.т.н., Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. На загальновідомих прикладах показано, що які б процеси не протікали у трибовузлах, в останніх у процесі експлуатації самостійно (без втручання ззовні) відбуваються явища, що сприяють зниженню тертя і швидкості зношування. Це свідчить про структурну самоадаптацію трибовузлів, які повною мірою можна віднести до термодинамічних систем.

Ключові слова: вузол тертя, знос, масло, сила тертя, інтенсивність зношування.

SELF-ADAPTATION OF TRIBOUNITS TO OPERATING CONDITIONS

Ye. Ventsel', Prof., D. Sc. (Eng.),
Kharkiv National Automobile and Highway University

Abstract. Using generally known examples it has been demonstrated that independently of the processes taking place in tribounits, in the course of their operation on their own (without interference) there occur phenomena making for reducing friction and wear rate. This testifies to structural adaptivity of tribounits, which can be fully attributed to the thermodynamic systems.

Key words: tribounit, wear, oil, friction force, wear rate.

Введение

Обобщая и анализируя общие объективные закономерности, определяющие тенденции процессов, происходящих в узлах трения, можно сделать вывод о том, что все эти процессы протекают в энергетически выгодном направлении, обеспечивая самоадаптацию узлов трения. При этом под самоадаптацией следует понимать самостоятельную (без вмешательства внешних воздействий) при-

способляемость узлов трения к условиям работы, вследствие чего имеет место стационарное состояние, характеризующееся постоянным минимальным значением силы трения и интенсивности изнашивания.

Анализ публикаций

Любое внешнее воздействие, выводящее узел трения из стационарного состояния, вызывает в нем ответные процессы, стремящиеся

противостоять, ослабить и даже полностью купировать результат этого воздействия, то есть вернуть узел трения в стационарное состояние. Таким образом, какие бы процессы не происходили при трении и изнашивании, результат может быть только один – стационарное состояние узла трения, то есть минимизация и стабилизация силы трения и интенсивности изнашивания. Указанные явления происходят в полном соответствии с известным принципом Ле-Шателье-Брауна, универсальность которого распространяется на все явления в природе и технике. Этот принцип хорошо согласуется с теоремой И. Пригожина [1], согласно которой производство энтропии при приближении термодинамической системы к стационарному состоянию стремится к минимальному положительному значению.

Цель и постановка задачи

Целью работы является показать на основе анализа изменения в процессе эксплуатации свойств узлов трения и смазывающих масел, их самоадаптацию к снижению интенсивности изнашивания.

Практические примеры самоадаптации

Рассмотрим некоторые известные в технике явления, протекающие в энергетически выгодном направлении, то есть в направлении самоадаптации [2].

На рис. 1 представлена классическая схема подшипника скольжения. В нерабочем состоянии (рис. 1, а) невращающийся вал под действием силы собственного веса и действующей нагрузки P занимает эксцентричное положение и находится в непосредственном контакте с подшипником. Это обусловлено тем, что диаметр подшипника больше диаметра вала, в результате чего между ними образуется серповидный зазор, заполненный смазочным маслом. Максимальный зазор Δ имеет место в верхней части подшипника. В рабочем состоянии (рис. 1, б), когда вал начинает вращаться, наблюдается гидродинамический эффект, заключающийся в самопроизвольном создании грузоподъемного масляного слоя между валом и подшипником. Такой слой, как отмечалось выше, образуется за счет втягивания в зазор масла микровыступами вала и адсорбции поверхностно-активных веществ.

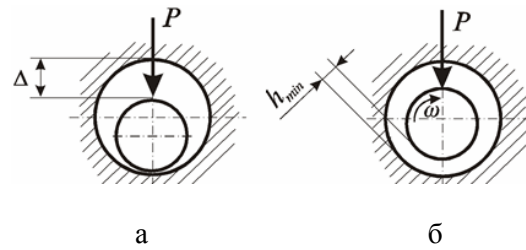


Рис. 1. Схема подшипника скольжения: а – вал в нерабочем состоянии; б – вал в рабочем состоянии

Близлежащие к поверхности вала слои масла за счет вязкости увлекают за собой соседние слои. При достаточных вязкости и скорости вала в слое масла создается давление, необходимое для отделения вала от подшипника, то есть вал всплывает на тонком слое масла и несколько смещается в сторону вращения.

В результате гидродинамическое давление, развиваемое в слое масла, обеспечивает разделение поверхностей вала и подшипника, и трение между поверхностями, которое характеризуется относительно большой интенсивностью изнашивания, заменяется внутренним трением слоев масла, толщина которых больше суммарной высоты микровыступов поверхностей вала и подшипника. В таких условиях не будет их непосредственного контакта, а следовательно, изнашивание будет минимальным: главным образом, из-за электростатических разрядов, опасного сближения поверхностей за счет внезапного увеличения нагрузки, а также при попадании в зазор частиц, размер которых превышает толщину гидродинамического слоя.

Несущая способность F масляного слоя может быть определена из уравнения

$$F = \frac{\mu\omega}{\varphi^2} l \cdot d \cdot \Phi_p, \quad (1)$$

где μ – динамическая вязкость масла; ω – угловая скорость вала; φ – относительный зазор; l – длина подшипника; d – диаметр вала; Φ_p – безразмерный коэффициент нагруженности подшипника.

Из уравнения (1) видно, что несущая способность масляного слоя, помимо конструктивных параметров подшипника, зависит от динамической вязкости масла и угловой

скорости. Любое изменение этих параметров на какое-то время выводит подшипник из стационарного (равновесного) состояния. Однако возникающие противодействия достаточно быстро возвращают подшипник в равновесное состояние. Так, например, при снижении по какой-либо причине температуры подшипника, а следовательно, и масла, вязкость последнего повышается, что приводит к увеличению сил внутреннего трения. Однако это приводит, в свою очередь, к росту температуры, то есть к падению вязкости. Следовательно, происходит возврат подшипника к стационарному состоянию.

Увеличение скорости также приводит к росту сил T внутреннего трения [2]. Это вызывает увеличение температуры, следовательно, падение вязкости, то есть стабилизацию величины несущей способности масляного слоя.

Если по какой-либо причине возрастает нагрузка, то вал под ее воздействием не выдавливает расположенный под ним несущий слой масла, и поверхность вала не вступает в непосредственный контакт с поверхностью подшипника, что может вызвать интенсивное изнашивание. Это обусловлено тем, что при возрастании нагрузки увеличивается несущая способность масляного слоя за счет роста вязкости с увеличением давления ($\mu_p = \mu_0 \cdot e^{\alpha p}$, где μ_p и μ_0 – соответственно динамическая вязкость масла при давлении p и атмосферном давлении, α – пьезокэффициент вязкости).

Таким образом, подшипник скольжения можно считать типичным примером узла трения, способным к самоадаптации, при которой автоматически обеспечивается минимизация сил трения и интенсивность изнашивания.

Известно, что в процессе работы узлов трения происходит изменение геометрических характеристик контакта. Это в первую очередь относится к начальному этапу эксплуатации – приработке, которая является процессом, приводящим к минимуму энергетических затрат на трение при установившемся режиме. Это выражается в том, что в процессе приработки, независимо от исходной микрорельефности, устанавливается оптимальная шероховатость, обеспечивающая минимум интенсивности изнашивания [2–5 и др.]. Это

подтверждается, в частности, экспериментами, проведенными Н.А. Каменевым [6].

Восемь хромированных гильз цилиндров были обработаны хонингованием до различной степени чистоты: высота микрошероховатостей находилась в пределах 0,2–1,6 мкм. После холодной обкатки на специальном стенде гильзы были подвержены испытаниям на двигателе в течение 80 часов. При замере чистоты поверхности гильз после испытаний было обнаружено, что независимо от исходной чистоты все цилиндры приобрели одинаковую шероховатость в пределах 0,24–0,28 мкм. В этом проявилась самоадаптация поверхностей трения: при более грубой чистоте возрастает деформационная составляющая силы трения, а при более высокой чистоте – адгезионная составляющая, то есть образовалась оптимальная чистота, обеспечивающая наилучшее сочетание $F_{\text{деф.}}$ и $F_{\text{адг.}}$, а следовательно, минимизацию силы трения и интенсивности изнашивания.

Наряду с изменением геометрических характеристик контакта, при приработке формируется структура и свойства поверхностных слоев, обеспечивающие самоадаптацию узлов трения. На основе рассмотрения общих закономерностей трения и изнашивания Б.И. Костецким [7, 8] была построена теория структурно-энергетической адаптации (структурной приспособляемости) поверхностей трения при механическом и термохимическом процессах. Согласно этой теории для всех материалов и условий среды существует определенный диапазон нагрузок и скоростей перемещений, при которых происходит нормальное протекание механо-химического изнашивания. При этом структура поверхностных слоев приобретает наибольшие для данных условий прочность и устойчивость к физико-химическим воздействиям («вторичные структуры»).

Когда чистота поверхности, структура и свойства поверхностных слоев становятся оптимальными, процесс приработки оканчивается, после чего силы трения и изнашивания квазистабiliруются, что характеризуется минимальными значениями температуры и интенсивности изнашивания. В этом случае узел адаптирован к условиям трения [9], то есть в максимальной степени приближен к стационарному состоянию.

Аналогичные процессы структурной приспособляемости характерны и для смазочных масел. Как отмечалось выше, в начальный период применения масло интенсивно окисляется, что сопровождается генерированием полярно-активных компонентов, способных создать на поверхностях трения прочную адсорбированную граничную пленку, снижающую изнашивание. С повышением по какой-либо причине температуры стойкость граничных пленок уменьшается, происходит десорбция [10], приводящая к увеличению интенсивности изнашивания. Однако вместе с ростом температуры интенсифицируется генерирование полярно-активных компонентов, образующих в этих условиях вторичные граничные пленки. Таким образом, процесс трения и изнашивания вновь квазистабилизируется. При определенных условиях при отсутствии граничных пленок возможно образование самогенерирующихся органических пленок, обнаруженных М.В. Райко в зубчатых передачах [11].

Одновременно в начальный период работы в масле интенсивно увеличивается содержание механических примесей, способствующих снижению силы трения и изнашивания за счет разделяющего действия. Размеры механических примесей, как правило, превышают толщину граничных масляных пленок. В связи с этим, по нашему мнению, в узле трения основным видом износа является дистанционный износ при антифрикционном контактировании поверхностей [2, 4, 5, 12]. Такое название, очевидно, наиболее полно отражает специфические условия фрикционного контакта в реальных условиях применения масла. Этот вид износа обладает двумя важными особенностями: минимизацией скорости изнашивания и саморегулированием антифрикционного разделения поверхностей.

Первое обстоятельство заключается в следующем. При дискретном контакте поверхностей внутреннее трение масла заменяется трением между поверхностями через частицы, которые способствуют свободному перетеканию электростатических зарядов с одной поверхности трения на другую и уменьшают электростатическую составляющую износа. Истирающее действие поверхностей диспергирует эти частицы, приближая их по размеру к толщине масляной пленки. Диспергирование способствует увеличению адсорбционной активности, приводящей к улучшению противоизносных свойств масла [2 и др.].

Образование на поверхности частиц адсорбированной пленки является ответным актом, то есть признаком приспособляемости масла к условиям трения или самоадаптации.

Саморегулирование антифрикционного разделения поверхностей заключается в следующем. Находящиеся в масле взвешенные частицы непрерывно уничтожаются и экстрагируются. Они частично уходят вместе с маслом в камеры сгорания двигателей либо уносятся с утечками через неплотности систем смазки или гидроприводов, отбираются фильтрами, центрифугами и т.п. Однако как только их становится недостаточно для обеспечения разделяющего действия, поверхности начинают контактировать непосредственно вершинами микровыступов, что приводит к появлению новых частиц.

Когда количество полярно-активных компонентов и механических примесей для конкретных условий трения окажется достаточным для обеспечения минимальных сил трения и изнашивания, процесс изменения физико-химических свойств масла квазистабилизируется.

Весь комплекс образующихся в масле продуктов является проявлением его «приработки», то есть структурной приспособляемости, что также можно квалифицировать как явление образования в масле вторичных структур [2, 4, 5].

Однако масла менее стабильны по своим свойствам, чем поверхности. Поэтому по истечении некоторого промежутка времени свойства масел ухудшаются, а замена отработанных масел свежими вновь требует их адаптации к условиям трения, то есть необходимости повторной приработки масла, что выводит узел трения из стационарного состояния.

Таким образом, в узлах трения одновременно протекают следующие два явления: структурная приспособляемость поверхностей и структурная приспособляемость масла, то есть имеет место проявление комплексной структурной приспособляемости.

Выводы

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что сущность явлений, проте-

кающих в узлах трения, такова, что любые внешние воздействия способствуют возникновению внутренних процессов, снижающих отрицательную, с точки зрения изнашивания, эффективность этих воздействий, то есть узлы трения за счет самоадаптации способны самостоятельно приходить в стационарное (равновесное) состояние, при котором сила трения и интенсивность изнашивания минимальны.

Литература

1. Гленсдорф П. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуации // П. Гленсдорф, И. Пригожин. – М.: Мир, 1973. – 280 с.
2. Венцель Е.С. Улучшение эксплуатационных свойств масел и топлив / Е.С. Венцель. – Х., 2010. – 224 с.
3. Венцель С.В. Смазка и долговечность двигателей внутреннего сгорания / С.В. Венцель. – К.: Техника, 1977. – 208 с.
4. Венцель Е.С. Применение второго начала термодинамики к описанию процесса трения / Е.С. Венцель // Совершенствование сельскохозяйственных тракторов и автомобилей. – 1976. – Вып. 4, Т. XIII. – С. 52–55.
5. Венцель С.В. Применение положений термодинамики неравновесных процессов в химмотологии и триботехнике / Е.С. Венцель, Е.А. Миронов // Химия и технология топлив и масел. – 1982. – №2. – С. 16–18.
6. Каменев Н.А. Выбор и получение оптимальной чистоты поверхности хромированных цилиндров двигателей / Н.А. Каменев // Труды семинара по качеству поверхности деталей машин. – М.: АН СССР, 1955. – С. 105–107.
7. Костецкий Б.И. О роли вторичных структур в формировании механизмов трения, смазочного действия и изнашивания / Б.И. Костецкий // Трение и износ. – 1986. – №4, Т.1. – С. 622–637.
8. Костецкий Б.И. Классификация видов поверхностного разрушения и общие закономерности трения и изнашивания / Б.И. Костецкий // Вестник машиностроения. – 1984. – №11. – С. 10–12.
9. Канарчук В. Е. Некоторые положения теории адаптации при трении твердых тел / В.Е. Канарчук // Проблемы трения и изнашивания. – 1978. – Вып.14. – С.12–14.
10. Матвеевский Р.М. Температурная стойкость граничных смазочных слоев и твердых смазочных покрытий при трении металлов и сплавов / Р.М. Матвеевский. – М.: Наука, 1971. – 228 с.
11. Райко М.В. Смазка зубчатых передач / М.В. Райко. – К.: Техника. 1970. – 196 с.
12. Венцель С.В. Применение смазочных масел в двигателях внутреннего сгорания / С.В. Венцель. – М.: Химия, 1979. – 240 с.

Рецензент: И.Г. Кириченко, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 2 марта 2015 г.